



В.В. Мамаев

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ПУЧКЕ ТРУБ**

Екатеринбург  
2012

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра энергетики

В.В. Мамаев

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА В ПУЧКЕ ТРУБ**

Методические указания к лабораторной работе № 15 по дисциплине  
«Теплотехника» для студентов направлений 150400, 190500, 240100,  
250400, 280200 и специальностей 150405, 190601, 190603, 190701, 190702,  
240406, 240502, 250401, 250403, 280201, 280202

Екатеринбург  
2012

Печатается по рекомендации методической комиссии ЛМФ.  
Протокол № 1 от 10.09.2011 г.

Рецензент доцент канд. техн. наук А.И. Сафронов.

Редактор Е.Л. Михайлова  
Оператор Е.В. Карпова

---

Подписано в печать 17.10.12.		Поз. 50
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 10 экз.
Заказ №	Печ. л. 0,7	Цена руб. коп.

---

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ  
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В рекуперативных теплообменных аппаратах осуществляется теплопередачей от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку труб. Один теплоноситель протекает внутри труб, скомпонованных в виде пучка, другой - в межтрубном пространстве.

Процесс теплообмена между любым теплоносителем и стенкой называется теплоотдачей.

Интенсивность теплоотдачи определяется характером движения теплоносителя, а также геометрическими размерами и взаимным расположением труб в пучке.

При поперечном омывании теплоносителем пучков труб различают следующие режимы движения: ламинарный, смешанный и турбулентный. Наибольшее распространение получил смешанный режим, при котором жидкость между трубами движется турбулентно, а трубы первого рода оmyваются ламинарным потоком.

Он наблюдается при значении критерия Рейнольдса равным  $10^3 \dots 10^5$ ; при  $Re > 10^5$  имеет место турбулентный режим, а при  $Re < 10^3$  – ламинарный.

Характерной особенностью смешанного и турбулентного режимов является отрыв потока от поверхности трубы и образование вихрей (рис. 1). Картина смывания поверхности существенно зависит от взаимного расположения труб в пучке: шахматного или коридорного (рис. 2). Трубы первого ряда обоих пучков оmyваются одинаково (рис. 1): на лобовой поверхности жидкости образуется пограничный слой, толщина которого по мере перемещения жидкости к экватору постепенно возрастает. Около экватора этот слой отрывается от поверхности и уносится потоком.

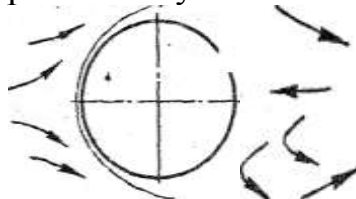


Рис. 1 Обтекание одиночной трубы.

В кормовой части трубы стенка оmyвается возникающими вихрями, которые непрерывно смешиваются с основным потоком.

Интенсивность теплоотдачи по периметру трубы определяется характером оmyвания, поэтому коэффициент теплоотдачи имеет максимальное значение в лобовой точке, постепенно уменьшаясь за счет увеличения толщины прогретого слоя.

После отрыва пограничного слоя от поверхности коэффициент теплоотдачи снова возрастает за счет образования вихревой зоны. Однако лобо-

вая часть труб второго и последующих рядов затеняется впереди расположенными трубами, в результате чего омывается с меньшей интенсивностью.

Поэтому максимальное значение коэффициента теплоотдачи смещается на боковые участки, где происходит набегание потока, движущегося между труб. Начиная с 3-го ряда, устанавливается турбулентность, характерная для данной компоновки пучка, и теплоотдача стабилизируется.

При расчете теплообменных аппаратов обычно используется средний по периметру трубы коэффициент теплоотдачи, который определяется для третьего и последующих рядов по эмпирическому критериальному уравнению

$$Nu_{ж,α} = c Re_{ж,α}^n Pr_{ж}^{0,33} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \varepsilon_s, \quad (1)$$

где  $c = 0,41$ ,  $n = 0,6$  - для шахматных пучков;

$c = 0,28$ ,  $n = 0,65$  - для коридорных пучков;

$Pr_{ж}$  и  $Pr_c$  - числа Прандтля, принимаемые по таблице 1 соответственно при температуре потока воздуха и при температуре стенки трубы;

$\varepsilon_s$  - коэффициент, учитывающий влияние на интенсивность теплоотдачи поперечного  $S_1$  и продольного  $S_2$  шагов труб (рис. 2).

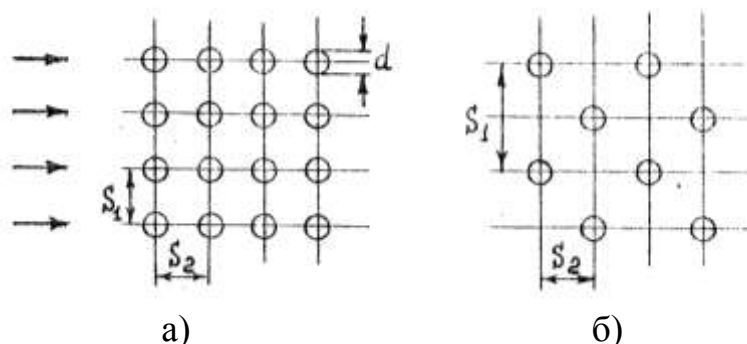


Рис. 2 Характер расположения труб для коридорного (а) и шахматного (б) пучков

Таблица 1

Физические параметры сухого воздуха

$t_b, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
10	1,51	14,16	0,705
20	2,59	15,06	0,703
30	2,67	16,00	0,701
40	2,76	16,96	0,699
50	2,83	17,95	0,697
60	2,90	18,97	0,696
70	2,96	20,02	0,694
80	3,05	21,09	0,692

Для коридорного пучка  $\varepsilon_s = (s_2/d)^{-0,15}$ ;

Для шахматного -  $\varepsilon_s = (\frac{s_1}{s_2})^{1/6}$  при  $\frac{s_1}{s_2} < 2$ ;  $\varepsilon_s = 1,12$ , если  $\frac{s_1}{s_2} \geq 2$ .

Критерий Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$Re_{ж, \alpha} = \frac{\omega d}{\nu} \frac{\omega \alpha}{\nu}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – скорость потока в наиболее узком сечении пучка труб, м/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с (табл. 1 при температуре воздуха  $t_b$ ).

$D$  – наружный диаметр труб, м;

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Экспериментально исследовать зависимости коэффициента теплоотдачи и гидравлического сопротивления пучка труб от скорости движения теплоносителя.

2. Сравнить опытные данные с расчетными.

## Описание экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. Основным ее элементом является модель теплообменника, расположенного в аэродинамической трубе. Поток воздуха создается с помощью вентилятора 9, на входном патрубке которого имеется регулирующий шибер.

Теплообменник состоит из пучка труб диаметром 12 мм. Расположение труб в пучке коридорное, поперечный шаг между осями труб  $S_1 = 24$  мм, продольный  $S_2 = 26$  мм, число труб в ряду  $n = 8$ .

Исследование теплоотдачи производится методом локального моделирования, для чего в одну из труб пятого ряда установлен электрический нагреватель 2. Мощность нагревателя измеряется при помощи амперметра 8 и вольтметра 1. Температура набегающего потока измеряется ртутным термометром, а скорость воздуха определяется пневмометрической трубкой 3. Температура наружной поверхности нагреваемой трубки контролируется термопарой 7, холодный спай которой помещается в термостат с тающим льдом 5. Измерение ЭДС термопары производится потенциометром 6. Переход от ЭДС термопары к значению температуры поверхности трубки  $t_{ст}$  осуществляется с помощью градуировочного графика. Статический и динамический напоры, а также гидравлическое сопротивление пучка труб измеряются микроманометрами 4.

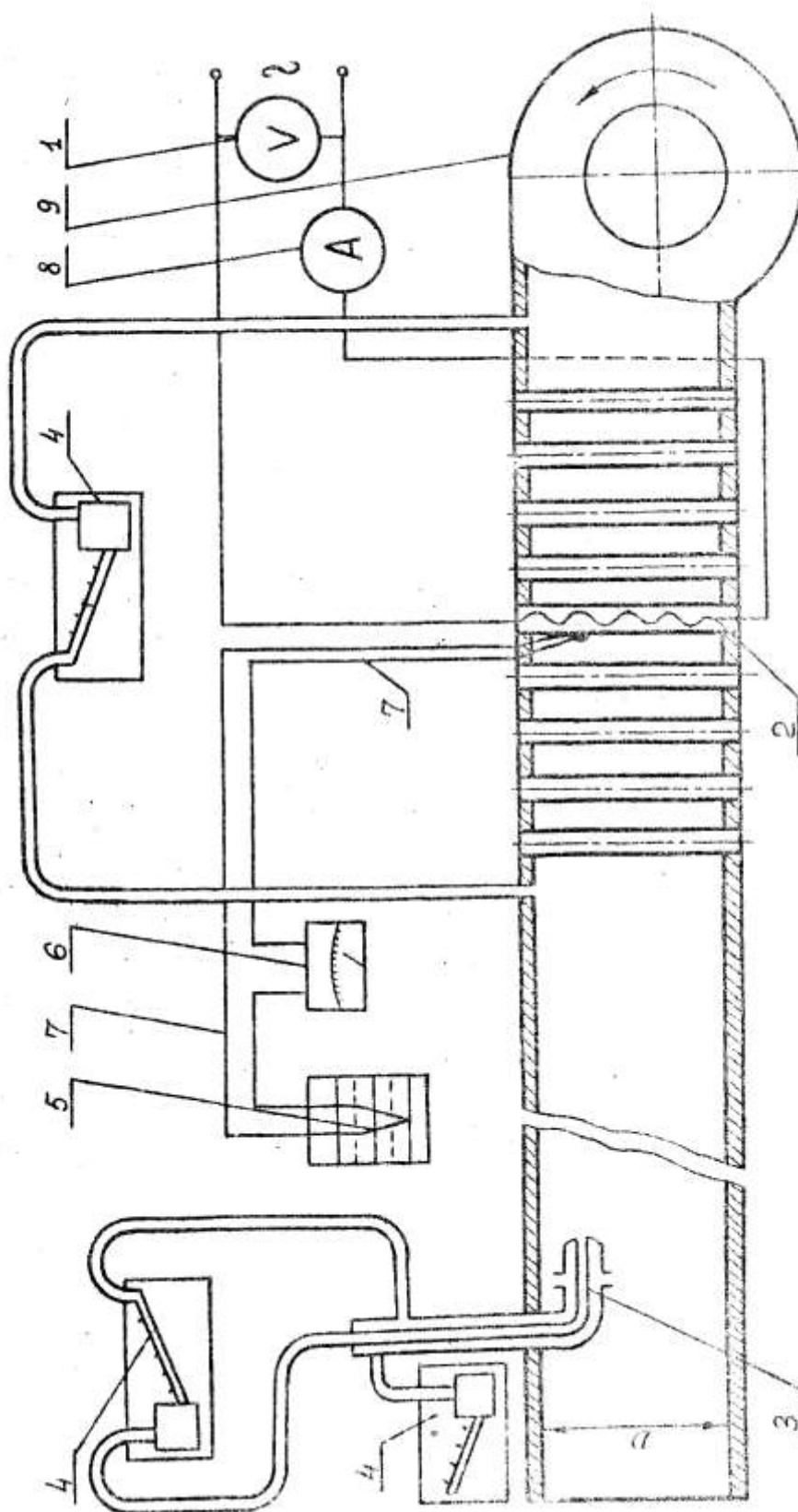


Рис. 3 Схема экспериментальной установки.

1 – вольтметр; 2 – нагреваемая трубка; 3 – пневмометрическая трубка; 4 – микроамперметр; 5 – холодный спай термопары; 6 – потенциометр; 7 – термопара; 8 – амперметр; 9 – вентилятор.

## ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения среднего по сечению трубы динамического напора воздуха пневмометрическая трубка последовательно устанавливается в пяти различных точках воздуховода.

Опыты проводятся при трех положениях шиберов вентилятора: 1 - шибер полностью открыт; 2 - открыт, примерно, на 25%; 3 - закрыт полностью. Все замеры производятся при установившемся тепловом режиме, когда температура стенки нагреваемой трубки устанавливается постоянной, то есть стрелка потенциометра перестает отклоняться. Результаты замеров вносятся в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты эксперимента

Наименование величин	Обозначения	Единицы измерения	Значения величин в опыте		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
Сила тока нагревателя	I	A			
Напряжение нагревателя	U	B			
Динамометрические напоры	H <sub>1</sub>	мм вод.ст.			
	H <sub>2</sub>	мм вод.ст.			
	H <sub>3</sub>	мм вод.ст.			
	H <sub>4</sub>	мм вод.ст.			
	H <sub>5</sub>	мм вод.ст.			
Средний динамический напор	H <sub>ср</sub>	мм вод.ст.			
Статический напор					
Показание потенциометра	A <sub>ст</sub>	мм вод.ст.			
	E	мВ			
Температура стенки					
	t <sub>с</sub>	°C			
Температура воздуха					
	t <sub>в</sub>	°C			
Барометрическое давление	P <sub>б</sub>	Па			
Гидравлическое сопротивление пучка	ΔS	мм вод.ст.			



Обработка опытных данных производится в критериальном виде. Для вычисления значений критериев подобия необходимо рассчитать среднюю скорость потока в узком сечении пучка  $\omega'$  и коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha$ .

Во всех применяемых ниже формулах следует обращать внимание на размерности величин: дифференциальные манометры, используемые в лаборатории, отградуированы в мм вод. ст., а в формулу 5 подставляются значения в Па ( $1 \text{ мм вод.ст.} = 1 \text{ кг/м}^2 = 9,81 \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}$ ).

Вначале определяется скорость потока воздуха за пучком, где установлена пневмометрическая трубка, м/с,

$$\omega = \sqrt{\frac{2gH_{\text{ср}}}{\rho}} \quad (3)$$

где  $H$  – динамический напор, мм вод.ст.,

$\rho$  – плотность воздуха, которая рассчитывается по формуле,  $\text{кг/м}^3$

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 P}{P_0 T}, \quad (4)$$

где  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха при нормальных условиях, когда  $\rho_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ ;  $T = 273 + t_{\text{в}}$  – абсолютная температура воздуха, К;

$p$  – давление воздуха, Па,

$$P = P_{\text{б}} + P_{\text{ст}}. \quad (5)$$

По уравнению неразрывности потока рассчитывается средняя скорость в пучке труб, м/с,

$$\omega' = \frac{\omega F}{F'}, \quad (6)$$

где  $F = \frac{\pi D^2}{4}$  – сечение трубы, в котором установлена пневмометрическая трубка,  $\text{м}^2$ ,  $D = 100 \text{ мм}$ ;

$F' = h(b - n\alpha)$  – узкое сечение в пучке труб,  $\text{м}^2$ ;

$h = 160 \text{ мм}$  – высота трубок;

$b = 206 \text{ мм}$  – ширина аэродинамической трубы;

$n$  – число трубок в ряду.

$d = 12 \text{ мм}$  – диаметр трубок.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией для каждого режима вычисляется по формуле,  $\text{Вт/м}^2\text{К}$ ,

$$\alpha = \frac{Q_k}{F_{\text{тр}}(t_{\text{с}} - t_{\text{ж}})} \frac{Q_k}{F_{\text{тр}}(t_{\text{с}} - t_{\text{в}})}, \quad (7)$$

где  $F_{\text{тр}} = \pi dh$  – боковая поверхность нагреваемой трубки,  $\text{м}^2$ ;

$Q_k$  – теплота, передаваемая конвекцией от трубки к потоку воздуха, Вт,

$$Q_k = Q - Q_{\text{л}}, \quad (8)$$

$$Q - \text{тепловая мощность нагревателя трубки, Вт,} \\ Q = I U, \quad (9)$$

где  $I$  – сила тока нагревателя, А;

$U$  – напряжение нагревателя, В.

$Q_{\text{л}}$  – теплота, передаваемая излучением, Вт ,

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{тр}} \quad (10)$$

где  $\varepsilon = 0,6$  – степень черноты трубки;

$c_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}^4}$  коэффициент излучения абсолютно черного тела;

$T_{\text{с}}$  и  $T_{\text{в}}$  – абсолютные температуры поверхности стенки и воздуха, К.

Все расчетные данные вносятся в табл. 3. По результатам расчетов отроются графики зависимости  $\alpha = f(\omega_{\text{уз}})$ ,  $\Delta s = f(\omega_{\text{уз}})$ ,  $\lg \text{Nu}_{\text{ж},\alpha} = f(\lg \text{Re}_{\text{ж},\alpha})$ .

На последний график (рис. 4) наносятся не только опытные точки, но и теоретическая прямая (по уравнению 1), для построения которой следует задаться двумя значениями критерия Рейнольдса (в пределах от 5000 до 50000).

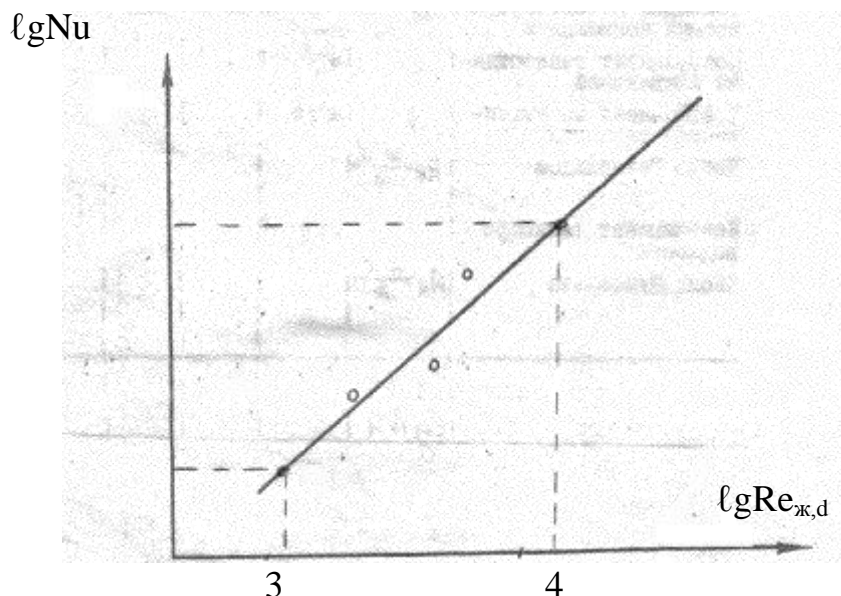


Рис. 4 Зависимость  $\lg \text{Nu}_{\text{ж},\alpha} = f(\lg \text{Re}_{\text{ж},\alpha})$

Таблица 3

Результаты расчетов

Наименование величин	Обозначения	Единицы измерения	Значения величин в опытах		
			1	2	3
1	2	3	4	5	6
Плотность воздуха	$\rho$	кг/м			
Скорость воздуха за пучком	$\omega$	м/с			
Скорость воздуха в пучке	$\omega'$	м/с			
Тепловой поток, передаваемый излучением	$Q$	Вт			
Тепловая мощность нагревателя	$Q$	Вт			
Тепловой поток, передаваемый конвекцией	$Q$	Вт			
Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha$	Вт/(м · К)			
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu$	м <sup>2</sup> /с			
Число Рейнольдса	$Re = \frac{\omega' d}{\nu}$				
Коэффициент теплопроводности	$\lambda$	Вт/(м · К)			
Число Нуссельта	$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$				
	lg Re lg Nu				

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется коэффициентом теплоотдачи?
2. Какова размерность коэффициента теплоотдачи?
3. Как меняется теплоотдача по периметру трубы?
4. Различие ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости?
5. Какова зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости набегающего потока ?
6. Зависит ли коэффициент теплоотдачи от диаметра трубы?
7. Как рассчитываются числа подобия?
8. Что является определяющим размером и определяющей температурой при нахождении критериев?
9. Как определяется тепловой поток в процессах теплоотдачи и теплового излучения?